DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160781

李薇, 谈明洪. 太行山区不同坡度 NDVI 变化趋势差异分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 509−519
Li W, Tan M H. NDVI variation tendency under different slopes in Taihang Mountain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 509−519

太行山区不同坡度 NDVI 变化趋势差异分析*

李 薇[1,2], 谈明洪[1,3]**

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100190; 3. 中国科学院大学国际学院 北京 100190)

摘 要: 山区坡度对土壤侵蚀和植被生长有重要影响。分析不同坡度 NDVI 变化趋势的差异有助于理解植被对不同坡度的响应情况, 加深对植被变化影响机制的理解。本文基于 MODIS 数据和 DEM 数据, 以生长季 NDVI 均值为表征指标, 采用基于像元的趋势分析方法以及基于坡度的回归分析法, 分析了太行山地区 2000—2015 年间植被变化情况, 并且对植被变化趋势与坡度关系的规律做了系统性分析。同时, 本文采用土地利用转移矩阵来分析 2000 年和 2010 年两期不同坡度土地类型流转的面积及方向, 探讨土地利用变化对不同坡度植被变化的影响状况。结果表明: (1)研究时段内太行山区植被总体上得到改善, 植被改善区域占该区总面积的 93.5%。(2)NDVI 增加趋势在中西部地区(山西省境内)最为明显, 东部和南部部分中低海拔区出现减少趋势, 主要集中在东部邻接华北平原的低山丘陵区。(3)坡度较大的区域生长季平均 NDVI 较高。(4)植被变化趋势(y)与坡度(x)之间的关系为非线性关系, 可用二次函数来表示, 其表达式为: $y=-0.311x^2+8.098x+28.027$。(5)当坡度在 7°~15°, 植被变好趋势最为明显, 其次是坡度为 15°~20°, 坡度 7°~20° NDVI 变化趋势均值分别比>20°区域和≤7°区域高 15.8%和 29.8%。(6)2000—2010 年在低(0°~7°)、中(7°~20°)和高坡度(>20°)区域, 耕地、林地、草地总面积均减少, 主要流向了建设用地和水域。然而, 3 个坡度范围 NDVI 变化趋势均为正, 且增加最明显的为中坡度地区, 然后依次是高坡度地区和低坡度地区。(7)NDVI 变化趋势受到土地利用类型和面积的影响较小, 主要受到自身生化条件、自然环境条件和人为扰动(土地利用强度等)的综合作用。基于以上结果, 本文对太行山区不同坡度土地资源的合理利用和生态环境保护具有重要意义。

关键词: 太行山区; 坡度; 植被; NDVI; 土地利用; 趋势线分析
中图分类号: P935.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)04-0509-11

NDVI variation tendency under different slopes in Taihang Mountain*

LI Wei[1,2], TAN Minghong[1,3]**

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. International College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Slopes in mountain areas are critical for the management of soil erosion and vegetation growth — a key determinant factor of site conditions of vegetation. Analysis of the variation tendency of NDVI (normal difference vegetation index) at different slope gradients in Taihang Mountain helps not only to understand the response of vegetation to slope gradients under

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB452705)资助
** 通讯作者: 谈明洪, 主要从事土地利用与土地覆被变化方向研究。E-mail: tanmh@igsnrr.ac.cn
李薇, 主要从事土地利用变化研究。E-mail: liw.14b@igsnrr.ac.cn
收稿日期: 2016-11-11 接受日期: 2017-01-20

* Founded by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2015CB452705)
** Corresponding author, E-mail: tanmh@igsnrr.ac.cn
Received Nov. 11, 2016; accepted Jan. 20, 2017

long-term adaptation, but also to deepen the understanding of the variation mechanism of vegetation. Using the 250 m × 250 m resolution MODIS data derived from NASA Terra Satellite, the 90 m × 90 m resolution DEM data from SRTMDEM, pixel-scale trend analysis and slope-related regression analysis, this study investigated the changes in vegetation conditions in Taihang Mountain for the period 2000–2015. As the most important indicator, average NDVI in growing season was used for vegetation condition. After the selection of about 1 000 typical samples in the study area, the relationship between changes in the greenness of vegetation and slope gradient was explored using regression analysis. Meanwhile, land use transition matrixes were used to explore the transfer and direction of the acreage of land between different land use types under different slope gradients. The results showed that: 1) the greenness of vegetation in Taihang Mountain improved for the study period, the vegetation-improving area accounted for 93.5% of the total study area. 2) The most obvious increase trend in NDVI was in the central and western regions (especially in central and east Shanxi Province). Also the most obvious decrease trend of NDVI was in patches of medium and lower elevations in eastern and southern Taihang Mountain, which was mainly concentrated in the eastern hilly regions adjacent to the North China Plain. 3) Average NDVI for the growing season increased with increasing slope. 4) The relationship between variation trend of NDVI (y) and slope (x) was non-linear, and the best represented by a quadratic function ($y = -0.311x^2+8.098x+28.027$). 5) The tendency for increase in NDVI was most obvious for slope gradient within the range of 7°–15°, then for slope gradient of 15°–20°. The tendency of NDVI variation in slope range of 7°–20° was 15.8% and 29.8% higher than that in the slope > 20° and ≤ 7°, respectively. 6) From 2000 to 2010, areas of arable land, grassland and forest land under lower (0°–7°), middle (7°–20°) and higher (> 20°) slopes decreased, and mainly transformed into construction land. However, the NDVI variation trends in the three slope ranges were all positive, and the most obvious was the middle slope area, followed by higher slope area and lower slope area. 7) The trend of NDVI variation was less affected by land use type and area, which was mainly influenced by its biochemical conditions, natural environment and human disturbance (land use intensity). Based on the above results, this paper is of great significance to rational utilization of land resources and ecological and environmental protection under different slopes of Taihang Mountain.

Keywords: Taihang Mountain; Slope; Vegetation; NDVI; Land use; Trend analysis

我国山区面积约占陆地总面积的 67%，山地生态环境复杂，山区环境变化及其生态承载力一直以来都是地理学和生态学的重要研究方向[1-2]。山区植被是大气、土壤和水分连接的关键要素，也是山区生态状况及全球环境变化的重要指标[3]。归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)是近年来表征植被状况的主要指数之一[4-5]。前人利用该指数开展了诸多研究，分析了植被覆盖特征[6-8]、植被年际变化规律和空间变异特征[9-13]。不少研究[14-18]显示近年来全球范围植被呈现出变好的趋势，尤其在北半球中高纬度地区变好趋势显著。朴世龙等[16]利用 NOAA-AVHRR 数据探讨了植被活动对全球变化的响应方式，发现我国 20 世纪 80、90 年代 NDVI 有明显增加趋势。刘爽等[19]利用 MODIS 数据发现 2000—2010 年中国植被绿度正在全面提高，荒漠化在减少。此外，NDVI 变化的影响因素也越来越受到学者们的关注，利用 MODIS 和 AVHRR 等数据源，国内外学者对影响 NDVI 变化的气候因素(如气温和降水)进行了深入分析[20-22]。Thavorntam 等[23]在泰国东北部开展的研究发现温度是影响常绿阔叶林植被生产力的重要因素。近年来越来越多的学者开始关注人类活动对植被变化的影响，认为人类活动在很多地区对植被变化起到决定性的作用[24-27]。综上所述，已有研究对植被覆被的时空变化进行了分析，并重点探讨了气候条件和人类活动对植被变化的影响。对自然因素的分析主要集中在气温和降水，但单独对坡度影响的宏观分析相对缺乏。

在山区，坡度对土壤侵蚀起到至关重要的作用[28]，它同时决定了植被的立地条件(如土壤水分、土壤厚度)，对植被生长具有重要影响。已有坡度对植被影响的研究主要集中在不同地形条件(高程、坡度和坡向)下的植被类型或景观格局的差异[29-31]，不同坡度标准对退耕和撂荒的影响等方面[28,32]。胥晓等[29]以四川小河沟自然保护区为对象，对植被类型在地形分布上的差异进行了研究，发现坡度由缓变陡植被结构会发生相应变化。唐克丽等[32]通过定位观测和降雨模拟试验，结合野外考察研究资料对黄土丘陵区退耕上限的坡度进行了论证。Ding 等[33]通过测量山坡梯度次生林群落组成和结构，研究了坡度对海南省撂荒地植被恢复的影响。金樑等[34]在研究黄土高原山地坡度对退耕农田生态系统自然植被演替的影响时发现，坡度对退耕农田植物群落的自然恢复影响显著。这些研究一定程度上揭示了坡度在植被恢复过程中的作用，但仅依赖简单的坡度分级对比不能有效地揭示坡度与植被变化趋势之间的关系。此外，部分学者在探讨植被变化的影响因素时对坡度的影响

有所涉及，但没有作为主要要素系统分析。综上可知，目前植被变化在不同坡度上的差异分析尚不完善。

太行山区位于我国黄土高原和华北平原的过渡地带，是京津冀大中城市和华北平原的生态屏障，也是我国水土流失较为严重的地区之一[35-37]。它作为北方典型的土石山区，土壤水分含量低、土层薄，人地关系矛盾尖锐[38]。长期来讲，坡度在很大程度上决定了植被的生长状况和恢复能力，探讨坡度对植被变化的影响机制对于缓解太行山区人地关系矛盾具有重要意义。但是目前坡度在植被长期适应过程中如何影响其空间分布仍不明晰。而已有的研究很少单独分析不同坡度条件下植被状况变化的差异，本研究对此主题进行探讨，利用趋势线的分析方法研究了 2000—2015 年太行山区的植被变化情况，并宏观分析了不同坡度植被变化状况。此外，利用回归分析方法提出了植被变化与坡度之间的数学关系式。并结合土地利用转移矩阵分析土地利用变化对不同坡度植被的影响状况。这对太行山区未来生态建设和土地资源的合理利用具有一定的借鉴意义，有助于理解植被变化对坡度的适应状况，同时，有利于对植被变化影响机制的理解。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

太行山位于 34°71′~40°34′N、110°60′~115°62′E，总面积约 12.7 万 km^2，是黄土高原和华北平原的过渡地带和地理分界线。平均海拔为 1 500~2 000 m，最高峰为小五台山，高 3 099 m。该区四季分明，为暖温带半湿润大陆性季风气候[35]。区域植被垂直差异性明显，自然植被[36]主要包括常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、灌丛、灌草丛和高山草甸等主要类型。太行山区地处河南、河北、山西和北京 4 省(市)，行政区划如图 1。

1.2　数据来源与预处理

本文数据包括 NDVI 数据、DEM 数据和土地利用数据。NDVI 数据来源于 NASA 平台(https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html)提供的 MODIS 植被指数产品 MOD13Q1，空间分辨率为 250 m，时间分辨率为 16 d，时间跨度为 2000—2015 年。NDVI 产品是在 Terra 星三级产品 MOD13Q 数据基础上经过拼接、投影转换、腌摸加工而成，并采用最大值合成法得到每月 NDVI 值。4—10 月份是太行山区植物生长季，本文利用每年 4—10 月份 NDVI 值计算该年生长季 NDVI 均值[20]，得到研究区 2000—2015 年 16 幅生长季 NDVI 均值影像图。DEM

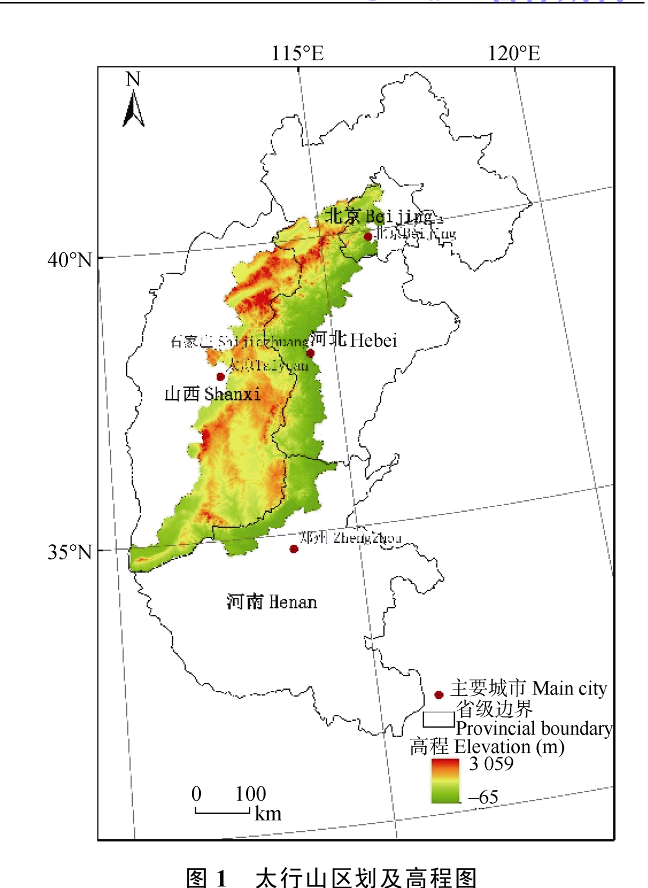


图 1　太行山区划及高程图

Fig. 1　Geographical location and elevation map of the Taihang Mountains

数据为中国范围 SRTMDEM 数据，数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)，空间分辨率为 90 m。利用 ArcGIS 空间分析功能(Spatial Analyst)计算得到太行山区坡度分布图，坡度单位为度。2000 年和 2010 年土地利用数据来源于全球变化科学研究数据出版系统出版的中国 5 年间隔陆地生态系统空间分布数据集(1990—2010)，空间分辨率为 100 m。

2　研究方法

2.1　样本选择及坡度分级

在太行山范围内进行随机均匀选择样点 1 000 个，为了减少随机误差和空间变异的影响，本文以半径为 3 km 画圆得到太行山样本区域(图 2)，控制各样本区域没有重叠，并删除落在建设用地范围内的样本，共 921 个样本纳入回归模型。统计各样本区域 NDVI 变化趋势和平均坡度情况，建立两者的回归模型，分析坡度与植被变化趋势的关系。为了解不同坡度下 NDVI 变化情况，本文参考张晓萍等[39]对坡度分异的分级标准，结合太行山区实际情况，将坡度共分为 7 个等级，即 0°~3°、3°~7°、7°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°和>25°。

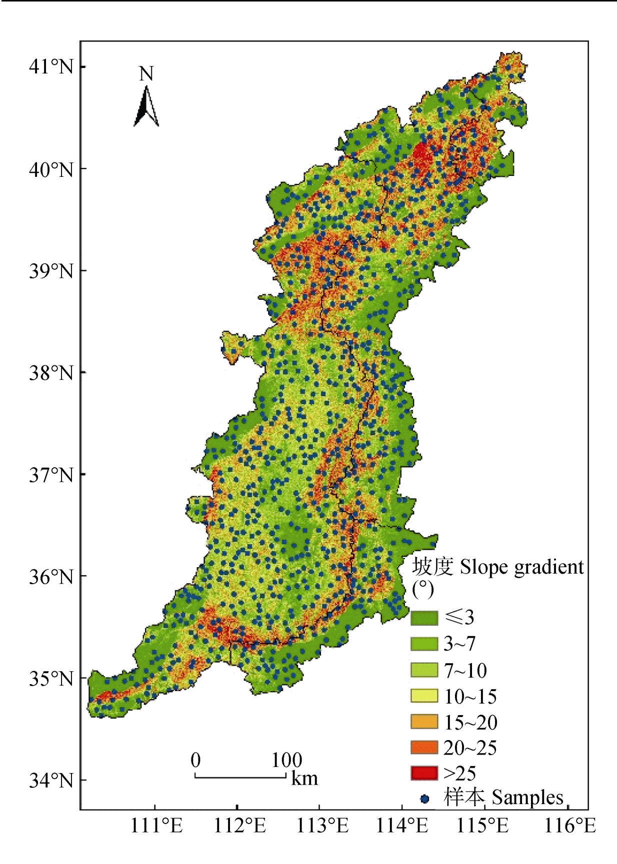


图 2 太行山区坡度和研究样本空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of slope and samples in the study area of Taihang Mountains

2.2 趋势线分析

本研究利用回归斜率对研究时段内 NDVI 的变化趋势进行分析[40]，即以时间 n 为自变量，逐像元对 NDVI 进行回归分析。根据回归方程斜率，判断该变量在研究时段的变化趋势，若斜率小于 0 说明该时段内植被呈减少趋势，反之则表现为增加趋势。其表达方程式如下：

$$y_{\mathrm{NDVI}} = \frac{n\sum_{j=1}^{n} jx_j - \sum_{j=1}^{n} j \sum_{j=1}^{n} x_j}{n\sum_{j=1}^{n} j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} j\right)^2} \tag{1}$$

式中：y_{NDVI} 为 NDVI 的变化趋势(即年际变化拟合曲线斜率值)；n 为研究时段年数，即 16 年；x_j 为第 j 年生长季 NDVI 值。借助 ArcGIS 软件的地图代数(Map Algebra)栅格计算器等工具，计算汇总得到研究区 2000—2015 年植被变化趋势数据。

2.3 NDVI 变化趋势与坡度回归分析

本文通过对 NDVI 变化趋势在太行山区分样本统计，借助 ArcGIS 软件的区域统计模块(zonal statistics as table)，按样本单元统计在研究时段内 NDVI 变化趋势和坡度数据，建立 NDVI 变化趋势与坡度的回归模型，分析坡度与 NDVI 变化趋势的关系。

2.4 土地利用转移矩阵

本文通过土地利用转移矩阵分析太行山区不同坡度的土地利用变化情况，并揭示该区域土地利用变化对植被状况的影响程度。土地利用转移矩阵能反映太行山区在研究时段内初期和末期各地类相互转化的动态过程，包括各地类相互转化的面积及转化方向[41]。其数学表达式[42]为：

$$A_{ij} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{vmatrix} \tag{2}$$

式中：A 为面积，n 为土地利用类型数，i, j 分别为研究初期和末期的土地利用类型。其中，A_{12} 表示第 1 类转为第 2 类的面积，A_{53} 为第 5 类转为第 3 类的面积。

3 结果与分析

3.1 各坡度 NDVI 年际变化特征分析

为揭示坡度对 NDVI 变化的影响，按坡度分级分别求得各坡度 NDVI 均值年际变化情况，如图 3a 所示。整体来看，研究时段内不同坡度等级 NDVI 值均呈上升趋势，16 年里有 4 个上升高峰期，分别为 2001—2004 年、2006—2008 年、2011—2012 年和 2013—2015 年。不同坡度年均 NDVI 值也具有差异，其中坡度越小 NDVI 值也越小。

图 3b 表示各坡度 NDVI 年际变化拟合曲线斜率值，总体来讲，各坡度 NDVI 在研究时段均呈现上升的趋势，植被处于恢复过程。其中，NDVI 变化趋势随着坡度增加表现出先增加后减少的趋势，坡度在 7°~20°植被变好最明显(图 3b)。

3.2 NDVI 变化趋势的空间分布情况

逐像元计算 2000—2015 年 16 年生长季 NDVI 均值，通过公式(1)求得各像元 NDVI 年际变化斜率值，该斜率能表示 NDVI 的变化趋势(图 4)。从图 4 可知，研究时段内该区域 93.5%的地区 NDVI 值均表现出增加的趋势(图中绿色部分)，植被状况整体好转，尤其以中西部地区(山西省境内)增加明显，东部和南部中低海拔区出现减少趋势(图中红色部分)。减少区域主要集中在东部邻接华北平原的低山丘陵区。

3.3 坡度与 NDVI 变化趋势的关系

3.3.1 回归分析

由 921 个样本 NDVI 变化趋势和坡度的散点图(图 5)可知，NDVI 变化趋势与坡度呈现二次函数关

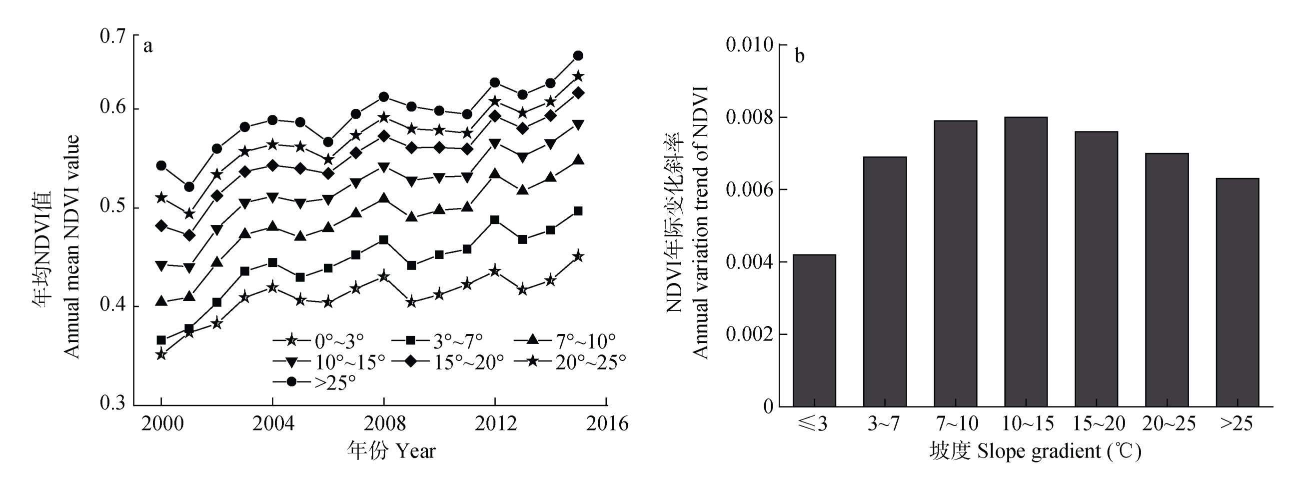


图 3　2000—2015 年太行山区各坡度 NDVI 平均值(a)和 NDVI 年际变化斜率(b)图

Fig. 3　Annual average NDVIs (a) and annual variation trends of NDVI (b) for different slopes in Taihang Mountains from 2000 to 2015

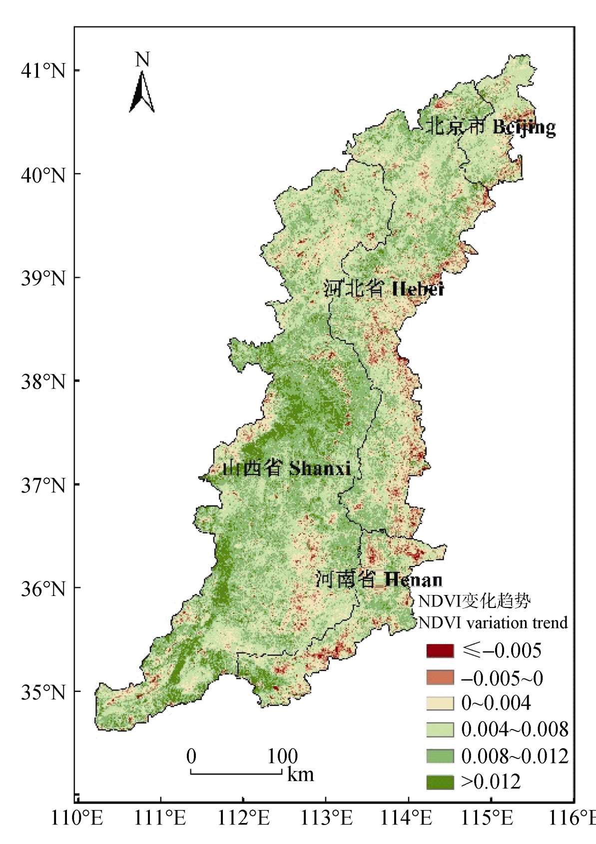


图 4　太行山区 2000—2015 年 NDVI 年际变化趋势空间分布图

Fig. 4　Spatial distribution of the trend of annual NDVI variation in Taihang Mountains from 2000 to 2015

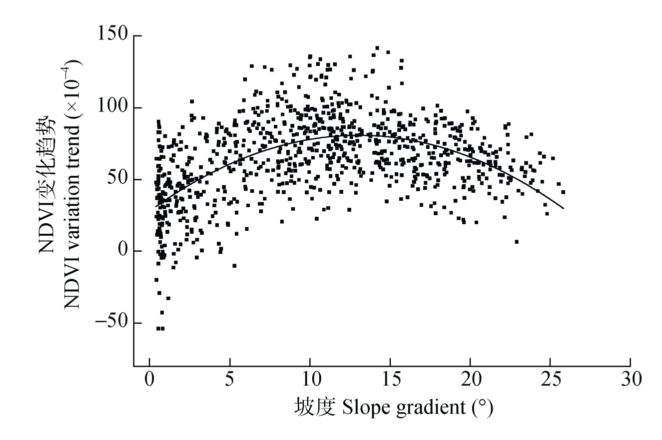


图 5　太行山区各样本 2000—2015 年 NDVI 变化趋势和坡度的散点图

Fig. 5　Scatter plot of the trend of annual NDVI variation from 2000 to 2015 and slope gradient in Taihang Mountains

系。以研究区 2000—2015 年 NDVI 变化趋势为因变量，坡度为自变量建立回归模型。该模型 *F* 值为 212.820，在 0.001 水平上显著。该回归模型揭示了坡度与 NDVI 变化趋势的关系，坡度及坡度二次项均在 0.001 水平上显著影响 NDVI 的变化趋势，曲线的拟合优度为 0.315。其关系式为:

$$y = -0.311x^2 + 8.098x + 28.027 \quad (3)$$

式中: *y* 为 NDVI 变化趋势，*x* 为坡度。当坡度约为 13°时，NDVI 增加趋势达到最大值；当坡度小于 13°时，NDVI 变化趋势随着坡度增加而增加，即在该坡度范围植被变好趋势随着坡度缓慢增加；当坡度大于 13°时，NDVI 变化趋势随坡度的增加植被变好趋势开始减弱。

3.3.2　各等级坡度 NDVI 变化趋势差异分析

为区分 NDVI 变化趋势在不同坡度等级上的差异，本文按各坡度等级对 NDVI 变化趋势进行统计(表 1)。从各坡度范围平均值来看，NDVI 变化趋势最明显的坡度范围为 7°~15°，其次是 15°~20°，超过 20°和低于 7°的地区 NDVI 变化趋势都相对较小。其中，坡度 7°~20°范围 NDVI 变化趋势均值分别比超过 20°区域和低于 7°区域的高 15.8%和 29.8%。从标准差来看，随着坡度增加，标准差值越小，说明 NDVI 变化趋势分布随坡度增加呈集中趋势，即坡度较小的区域 NDVI 变化

表 1 太行山区不同等级坡度 2000—2015 年 NDVI 年际变化趋势统计量

Table 1 Statistics of trend of annual NDVI variation under different slopes from 2000 to 2015 $\times10^{-4}$

坡度分级 Slope grade (°)	最小值 Minimum	最大值 Maximum	范围 Range	平均值 Mean	标准差 St.
＜3	–429	428	857	41.43	49.02
3~7	–403	328	731	68.02	40.68
7~10	–412	328	740	78.54	37.62
10~15	–300	308	608	79.94	35.74
15~20	–360	254	614	75.44	33.72
20~25	–325	247	572	69.11	31.78
＞25	–387	215	602	62.14	28.41

趋势波动较大，其原因在于坡度小有利于植被生长，但坡度小的地区人类活动频繁，这也会对植被变化趋势造成较大的影响。

3.4 不同坡度土地利用变化及其对 NDVI 的影响

土地利用是影响植被变化的最为直接的因素，本研究从土地利用变化的角度对不同坡度植被变化的原因进行简要分析。由于 15°~20°是我国退耕还林还草的临界坡度[28]，结合表 1 所显示出的各坡度 NDVI 变化趋势差异，本文将已划分的坡度范围进行合并，分 3 个区域分别进行土地利用变化的分析(表 2 和表 3)，即低(0°~7°)、中(7°~20°)和高坡度(>20°)区域。

表 2 显示各坡度在 2000—2010 年间 NDVI 变化趋势和土地利用类型的面积大小及变化情况。总体上，从 2000 年到 2010 年各坡度 NDVI 都呈现出增加的趋势，中等坡度增加趋势最明显。而各坡度范围耕地面积均减少，草地面积有小范围减少，未利用地和其他用地极少量减少；林地面积增加，水域和建设用地面积增加。

表 2 2000—2010 年太行山区各坡度不同土地类型面积和变化率统计情况

Table 2 Proportions of different land use areas and change rates under different slopes in Taihang Mountains from 2000 to 2010

坡度范围 Slope	低坡度 Lower slope (slope≤7°)			中等坡度 Middle slope (7°<slope≤20°)			高坡度 Steep slope (slope>20°)		
NDVI 变化趋势 NDVI variation trend ($\times10^{-3}$)	6.30			9.09			7.37		
	面积 Area (10^4 hm^2)		变化率 Change rate (%)	面积 Area (10^4 hm^2)		变化率 Change rate (%)	面积 Area (10^4 hm^2)		变化率 Change rate (%)
	2000	2010		2000	2010		2000	2010	
耕地 Arable land	398.71	392.04	–1.67	116.20	115.17	–0.89	8.74	8.63	–1.29
林地 Woodland	45.73	46.07	0.73	216.88	216.97	0.04	132.76	132.69	–0.05
草地 Grassland	92.95	92.43	–0.56	212.34	211.97	–0.17	67.97	67.82	–0.22
水域 Water	16.49	17.15	4.02	2.19	2.63	19.78	0.55	0.60	9.75
建设用地 Construction land	52.15	58.35	11.89	3.50	4.39	25.22	0.29	0.56	95.64
未利用地 Unused land	0.61	0.60	–0.41	0.02	0.02	–0.48	0.00	0.00	0.00
其他用地 Others	0.15	0.15	–0.19	0.19	0.18	–1.08	0.07	0.07	–0.96

为探讨各土地利用类型的转化面积及转移方向，本文采用土地利用转移矩阵分析各坡度 2000 到 2010 年的土地利用变化情况。表 3 显示，在低坡度范围内，耕地减少部分主要用于建设用地的增加。减少的耕地中有 73.74%转化为建设用地，16.39%转化为水域，5.99%转化为林地，3.89%转化为草地；在中等坡度范围内，减少的耕地中有 41.41%转化为草地，26.87%、19.86%和 11.86%分别转化为水域、建设用地和林地；在高坡度范围内，减少的耕地中有 43.45%转化为草地，25.40%转化为水域，18.85%转化为建设用地，12.30%转化为林地。

由于灌溉农业的发展，农作物在生长季生长良好。因此，各土地利用类型中，能反映植被状况的包括耕地、林地和草地。在坡度<7°的低坡度地区，耕地、林地和草地转出面积分别为 73 799 hm^2、3 464 hm^2 和 8 557 hm^2，三者转入面积分别为 7 118 hm^2、6 793 hm^2、3 393hm^2，总体上面积减少 68 516 hm^2；尤其以耕地和草地减少明显，林地增加、建设用地和水域面积增加显著。在 7°~20°的中等坡度地区，耕地、林地和草地转出面积分别为 10 428 hm^2、

表 3　2000—2010 年太行山区高、中、低坡度地区土地利用变化的转移矩阵

Table 3　Transition matrixes of land use change in the steep, middle and lower slope areas of Taihang Mountains from 2000 to 2010

hm^2

2000 年 Year 2000	2010 年 Year 2010						
	耕地 Arable land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	其他用地 Others
	低坡度 Lower slope (slope≤7°)						
耕地 Arable land	3 913 302	4 419	2 870	12 092	54 418	0	0
林地 Woodland	143	453 875	93	871	2 357	0	0
草地 Grassland	533	1 241	920 922	2 487	4 296	0	0
水域 Water	6 302	1 102	295	155 598	1 570	0	0
建设用地 Construction land	140	31	135	376	520 792	0	0
未利用地 Unused land	0	0	0	0	25	6 040	0
其他用地 Others	0	0	3	0	0	0	1 536
	中等坡度 Middle slope (7°<slope≤20°)						
耕地 Arable land	1 151 595	1 237	4 318	2 802	2 071	0	0
林地 Woodland	6	2 166 464	429	301	1 581	0	0
草地 Grassland	41	1 903	2 114 840	1 281	5 354	0	0
水域 Water	67	22	15	21 783	34	0	0
建设用地 Construction land	0	28	98	84	34 828	0	0
未利用地 Unused land	0	0	0	0	1	207	0
其他用地 Others	0	0	15	0	5	0	1 831
	高坡度 Steep slope (slope>20°)						
耕地 Arable land	96 520	152	537	314	233	0	0
林地 Woodland	0	1 315 429	258	156	949	0	0
草地 Grassland	0	613	676 265	141	1 614	0	0
水域 Water	14	4	10	6 318	8	0	0
建设用地 Construction land	0	18	0	4	3 330	0	0
未利用地 Unused land	0	0	0	0	0	56	0
其他用地 Others	0	0	7	0	7	0	700

2 317 hm^2 和 8 579 hm^2，转入面积分别为 114 hm^2、3 190 hm^2 和 4 875 hm^2，植被面积减少 13 145 hm^2；在该区域耕地和草地面积也都存在一定程度减少，林地依然呈增加趋势，建设用地和水域面积增加明显，与低坡度地区类似，但变化面积远小于低坡度地区。在>20°的高坡度地区，耕地、林地和草地转出面积分别为 1 236 hm^2、1 363 hm^2 和 2 368 hm^2，转入面积分别为 14 hm^2、787 hm^2 和 812 hm^2，其面积减少 3 354 hm^2。高坡度地区耕地、林地和草地面积都不同程度减少，主要转变为建设用地和水域等。此外，3 个坡度范围未利用地和其他用地流转面积较小，流传率低，主要转变为建设用地和草地。

总的来说，上述 3 个坡度范围耕地、林地、草地总面积均减少，主要流向了建设用地和水域。然而，表 2 显示，在低、中、高 3 个坡度范围 NDVI 变化趋势均为正，且增加最明显的为中坡度地区，然后依次是高坡度地区和低坡度地区。由此可见，NDVI 变化趋势受土地利用类型变化的影响并不明显。植被变化受到其自身生化条件、自然环境因素以及人类活动扰动的综合作用。

4　结论与讨论

本文基于 MODIS 数据，分析了不同坡度下植被指数(NDVI)的变化情况，研究发现：太行山区年均 NDVI 值随着坡度的增加而增加，坡度较大的区域植被情况较好。坡度是影响土壤侵蚀的重要因素，能直接影响水分的分布和聚集状态[34]，不同坡度产生土壤侵蚀情况不同，对植被生长影响也不同。汪亚峰等[28]研究发现坡度大于 20°的坡耕地水土流失比较严重。而 21 世纪以来国家推行的退耕还林还草政策则明确规定禁止开垦大于 25°的坡耕地，这使得这一范围地区土壤侵蚀大大减少，植被状况得到恢复。唐克丽等[32]在研究黄土丘陵区退耕坡度时表明禁止开发大于 25°的陡坡，且尽可能控制在临界坡度 15°~20°以下。由此可见，坡度较高的地区以自然植被和退耕林为主，水土流失状况减弱，且受到

的人为活动破坏较少，相较缓坡地区植被 NDVI 值较高。

通过趋势线分析的方法，本文发现太行山区各坡度范围从 2000—2015 年 16 年间 NDVI 均呈增加的趋势，其面积占全区域的 93.5%。张晓萍等[39]研究表明退耕政策实施后退耕主要在坡度大于 8°的范围，集中在 15°以上地区。与上述研究不同的是，由于太行山区耕地主要分布在 15°以下区域[43]，退耕主要集中在中、低坡度范围。本文研究结果表明从 2000—2015 年中等坡度区域植被变好趋势明显。一方面，除退耕外，耕地撂荒在一定程度上能促进植被恢复。2000 年以来农村劳动力大量外迁，山区农村劳动力骤减。坡度大、土地生产率低的区域耕地撂荒现象严重[44]，经过长时间植被自然恢复过程，植被变好趋势明显。另一方面，7°~20°范围人口减少，人类活动扰动降低。从太行山区高程图来看，海拔较高的区域坡度也较大。人口迁出的区域多为海拔较高、坡度较大的地区，人口增加则在海拔较低、坡度较缓的河流、山谷和低洼地带。综上，退耕和撂荒的直接作用，以及人口迁出导致的人类活动强度降低的间接作用，使得耕地和人口分布较多的中等坡度地区植被恢复趋势最为显著。

此外，研究时段内坡度与 NDVI 变化趋势存在二次函数关系。以 13°为界，当坡度小于 13°时，随坡度增加植被变好趋势越来越明显；在 13°时达到最大值；当坡度大于 13°时，随坡度增加植被变好趋势开始减弱。有研究也得到相似规律[45]，但只是定性描述，缺乏数学论证。

从土地利用转移矩阵来看，土地利用类型和面积的变化对植被变化趋势的影响不明显。21 世纪初 10 年里耕地、草地减少，林地、水域和建设用地增加。低等级坡度减少的耕地主要流向建设用地，中高等坡度减少的耕地主要流向了林地和草地。3 个坡度等级 NDVI 的变化趋势为中等坡度>高等坡度>低等坡度，说明缓坡区受到城镇化的影响最大，植被变好趋势相对较弱；从耕、林、草地(植被)总面积来看，3 个坡度范围植被总面积降低，其中，低坡度降低量分别是中、高等坡度的 5.2 倍和 20.4 倍。由此可见，土地利用类型和面积的变化对植被有一定的影响，但并不能起到显著的作用。一方面，植被面积虽然在缩小，但减少的面积占植被总面积比例较小(表 2)，小范围的植被面积变化在大区域中影响甚微；另一方面，植被变化受到土地利用强度的影响较大，例如放牧强度降低、砍伐减少，林地和草地质量变好[46]。

综合来讲，植被变化主要受到植被自身生化特性、自然环境条件[3-4](气温、降水、坡度等)和人为活动扰动(土地利用强度、人口压力等)[24,26]的综合作用。方精云等[18]在研究中国植被活动变化时发现温度上升和夏季降水量增加以及农业活动加强可能是 NDVI 增加的主要驱动力。Cai 等[27]也分别分析了气候因素和人口因素对植被变化影响的显著性。这些研究都表明影响植被变化的因素复杂多样，是一个综合的效果。例如，山区农民生活水平提高，能源结构改善，对薪柴需求量下降；灌溉面积增加，气候条件变好，耕地质量变好。这些都有待于未来进一步的研究。

文章主要探讨太行山区不同坡度植被状况变化，从数学上论证了植被在不同坡度上的变化趋势，明晰了两者的关系。在植被变化的自然影响因素方面，前人的研究主要针对气温和降水，本文作为补充研究，单独分析了坡度的影响，这对于理解植被变化的影响因素具有十分重要的作用。但是本文并未涉及坡度对植被变化影响机制的相关分析。未来，坡度变化对植被影响的内在机制还需要进一步加强。

参考文献 References

[1] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 等. 基于SRP概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2084–2090
Liu Z J, Yu X X, Li L, et al. Vulnerability assessment of eco-environment in Yimeng Mountainous area of Shandong Province based on SRP conceptual model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2084–2090

[2] 王明伟, 许浒. 云南岩溶山区生态环境地质问题与可持续发展研究综述[J]. 生态经济, 2014, 30(9): 185–187
Wang M W, Xu H. Research review of karst mountain eco-environmental geological problems and sustainable development in Yunnan[J]. Ecological Economy, 2014, 30(9): 185–187

[3] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3): 204–210
Sun H Y, Wang C Y, Niu Z, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3): 204–210

[4] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504–1514
Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Impact of climate change and human activities in vegetation cover change on the Loess Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007,

37(11): 1504–1514

[5] 韦振锋, 王德光, 张翀, 等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1665–1670
Wei Z F, Wang D G, Zhang C, et al. Response of vegetation cover to climate change and human activities in Northwest China during 1999–2010[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1665–1670

[6] 王志慧, 李世明, 刘良云, 等. 基于 MODIS NDVI 时间序列的土地覆盖分层分类方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 910–919
Wang Z H, Li S M, Liu L Y, et al. Hierarchical land cover classification based on MODIS NDVI time-series[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 910–919

[7] 王红说, 黄敬峰. 基于 MODIS NDVI 时间序列的植被覆盖变化特征研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(1): 105–110
Wang H S, Huang J F. Study on characteristics of land cover change using MODIS NDVI time series[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Science, 2009, 35(1): 105–110

[8] 李月臣, 陈晋, 宫鹏, 等. 基于 NDVI 时间序列数据的土地覆盖变化检测指标设计[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(3): 44–58
Li Y C, Chen J, Gong P, et al. Study on land cover change detection method based on NDVI time series datasets: Change detection indexes design[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(3): 44–58

[9] 郑度. 中国西北干旱区土地退化与生态建设问题[J]. 自然杂志, 2007, 29 (1): 7–11
Zheng D. Issues on land degradation and eco-reconstruction in northeast arid region of China[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29 (1): 7–11

[10] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254–261
Li X B, Chen Y H, Zhang Y X, et al. Impact of climate change on desert steppe in northern China[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2): 254–261

[11] 陈效逑, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 84–94
Chen X Q, Wang H. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(1): 84–94

[12] 张宏斌, 唐华俊, 杨桂霞, 等. 2000—2008 年内蒙古草原 MODIS NDVI 时空特征变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 168–175
Zhang H B, Tang H J, Yang G X, et al. Changes of spatial-temporal characteristics based on MODIS NDVI data in Inner Mongolia grassland from 2000 to 2008[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 168–175

[13] 王娟, 李宝林, 余万里. 近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 132–138
Wang J, Li B L, Yu W L. Analysis of vegetation trend and their causes during recent 30 years in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(2): 132–138

[14] Myneni R B, Tucker C J, Asrar G, et al. Inter-annual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D6): 6145–6160

[15] Ramakrishna R, Nemani C D, Keeling H H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to1999[J]. Science, 2003, 300: 1560–1563

[16] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 119–125
Piao S L, Fang J Y. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 119–125

[17] 朴世龙, 方精云. 最近18年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4): 294–302
Piao S L, Fang J Y. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China[J]. Quaternary Science, 2001, 21(4): 294–302

[18] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强[J]. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2003, 33(6): 554–565
Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. Vegetation activities are enhancing in the past 20 years[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2003, 33(6): 554–565

[19] 刘爽, 宫鹏. 2000—2010 年中国地表植被绿度变化[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1423–1434
Liu S, Gong P. Change of surface cover greenness in China between 2000 and 2010[J]. China Science Bulletin, 2012, 57(16): 1423–1434

[20] 毛德华, 王宗明, 罗玲, 等. 基于MODIS和AVHRR数据源的东北地区植被 NDVI 变化及其与气温和降水间的相关分析[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 77–85
Mao D H, Wang Z M, Luo L, et al. Correlation analysis between NDVI and climate in Northeast China based on AVHRR and GIMMS data sources[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(1): 77–85

[21] 辜智慧, 陈晋, 史培军, 等. 锡林郭勒草原 1983—1999 年 NDVI 逐旬变化量与气象因子的相关分析[J]. 植物生态学报, 2005, 29(5): 753–765
Gu Z H, Chen J, Shi P J, et al. Correlation analysis of NDVI difference series and climate variables in Xilingole Steppe from 1983 to 1999[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(5): 753–765

[22] 齐述华, 王长耀, 牛铮, 等. 利用 NDVI 时间序列数据分析植被长势对气候因子的响应[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 91–99
Qi S H, Wang C Y, Niu Z, et al. SVI and VCI based on NDVI time-series dataset used to monitor vegetation growth status and its response to climate variables[J]. Progress in Geography, 2004, 23(3): 91–99

[23] Thavorntam W, Tantemsapya N. Vegetation greenness

modeling in response to climate change for Northeast Thailand[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(6): 1052–1068

[24] Lü Y H, Zhang L W, Feng X M, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning, and influential factors[J]. Science Reports, 2015, 5: 1–8

[25] Lu Y, Fu B, Wei W, et al. Major ecosystems in China: Dynamics and challenges for sustainable management[J]. Environmental Management, 2011, 48: 13–27

[26] Li A, Wu J G, Huang J H. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: A critical application of RESTREND in inner Mongolia[J]. Landscape Ecology, 2012, 27: 969–982

[27] Cai H Y, Yang X H, Wang K J, et al. Is forest restoration in the Southwest China karst promoted mainly by climate change or human-induced factors?[J]. Remote Sensing, 2014, 6: 9895–9910

[28] 汪亚峰, 李茂松, 卢玉东, 等. 试论退耕还林中对坡度标准的界定[J]. 水土保持科技情报, 2004, 6(1): 25–27
Wang Y F, Li M S, Lu Y D, et al. Analysis of definition of slope gradient criterion for farmland to forest[J]. Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 2004, 6(1): 25–27

[29] 胥晓, 吴勇, 廖咏梅. 四川小河沟自然保护区植被类型在地形上的分异研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 572–578
Xu X, Wu Y, Liao Y M. Topographic variation of vegetation types in Xiaohegou Nature Reserve of Sichuan Province[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(3): 572–578

[30] 汪荣, 潘文斌. 武夷山国家级自然保护区植被类型的地形分异[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(6): 731–735
Wang R, Pan W B. Topographic differences for vegetation types in Wuyishan National Nature Reserve, Fujian Province[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2007, 24(6): 731–735

[31] 孔宁宁, 曾辉, 李书娟. 四川卧龙自然保护区植被的地形分异格局研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2002, 38(4): 543–549
Kong N N, Zeng H, Li S J. Study on the topographic variation pattern of vegetation distribution in Wolong Nature Reserve, Sichuan Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2002, 38(4): 543–549

[32] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报, 1998, 43(2): 200–203
Tang K L, Zhang K L, Lei A L. Analysis of the maximum slope for returning farmland to forest in loess hilly-gully region[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(2): 200–203

[33] Ding Y, Zang R G, Jiang Y X. Effect of hillslope gradient on vegetation recovery on abandoned land of shifting cultivation in Hanan Island, South China[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(6): 642–653

[34] 金樑, 杜晓光, 侯扶江, 等. 黄土高原山地坡度对退耕农田生态系统自然植被演替初期的影响[J]. 草业科学, 2007, 24(7): 66–71
Jin L, Du X G, Hou F J, et al. Effects of hillside slopes on plant community succession of re-natural farmland in the Loess Plateau[J]. Patacultural Science, 2007, 24(7): 66–71

[35] 查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97–100
Zha X, Tang K L. Study on comprehensive control model of small watershed eco-environment in water and wind crisscrossed erosion zone[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(1): 97–100

[36] 刘晗, 吕斌. 太行山区牛叫河小流域土地可持续利用模式探讨[J]. 地理研究, 2012, 31(6): 1050–1056
Liu H, Lyn B. Study on development and utilization of a microscale basin: A case study in the Niujiaohe River of Taihang Mountains[J]. Geographic Research, 2012, 31(6): 1050–1056

[37] 顾卫明, 刘金涛. 山丘区小流域地形空间分析及数字信息提取[J]. 水文, 2009, 29(4): 34–36
Gu W M, Liu J T. Spatial analysis of hilly catchment based on digital drainage network extraction information[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(4): 34–36

[38] 刘育明. 山区生态环境演化及其驱动力研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2008
Liu Y M. A study on ecological environment change and its driving force in mountain area — Taking Hebei Taihang Mountain for a case[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2008

[39] 张晓萍, 李锐, 杨勤科, 等. 基于 RS/GIS 的中尺度地区退耕变化及其坡度分异研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 388–392
Zhang X P, Li R, Yang Q K, et al. Study of land-use/farming land converting change and their slope gradient differentiation on the middle scale research site using remote sensing data[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(8): 388–392

[40] Li S J, Sun Z G, Tan M H, et al. Effects of rural-urban migration on vegetation greenness in fragile areas: A case study of Inner Mongolia in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(3): 313–324

[41] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1497–1507
Qiao W F, Sheng Y H, Fang B, et al. Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: A case study of Suzhou, Jiangsu Province[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1497–1507

[42] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643–650
Zhu H Y, Li X B. Discussion on the index method of regional land use change[J]. Acta Geographica Sinca, 2003, 58(5): 643–650

[43] 许宁, 张广录, 刘紫玉. 基于地形梯度的河北省太行山区土地利用时空变异研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1284–1292

Xu N, Zhang G L, Liu Z Y. Spatial-temporal variability of land use with terrain gradient in Taihang Mountain, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(10): 1284–1292
[44] 马清欣, 何三林. 对当前农村耕地撂荒和耕地质量下降问题的探讨[J]. 中国农业资源与区划, 2002, 23(4): 22–24
Ma Q X, He S L. To probe into the problems of arable land wasting and its quality declining in rural areas at present[J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2002, 23(4): 22–24
[45] 张晓凤. 坝上地区植被覆盖变化及影响因素分析[D]. 烟台: 鲁东大学, 2016
Zhang X F. Analysis of vegetation cover change and its influence factors in Bashang area[D]. Yantai: Ludong University, 2016
[46] 江源, 章异平, 杨艳刚, 等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被-土壤系统耦合的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 837-846
Jiang Y, Zhang Y P, Yang Y G, et al. Impacts of grazing on the system coupling between vegetation and soil in the alpine and subalpine meadows of Wutai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 837–846